

Определение величины входного импульса как поправки к силе от тяги ГТД в (закрытом) боксе испытательного стенда

Клинский Б.М.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: bmklinский@ciam.ru

Рассмотрены вопросы определения величины входного импульса в качестве поправки к измеренной силе от тяги двигателя, испытываемого в компоновке с присоединенным входным лемнискатным насадком в (закрытом) боксе испытательного стенда. Предложена методика оценки величины входного импульса, основанная на определении разности величин тяги лемнискатного насадка при переходе от условий его работы в бесконечном пространстве, эквивалентных работе на эталонном открытом стенде, к условиям работы в ограниченном пространстве бокса испытательного стенда. На примере анализа результатов аэродинамической аттестации (закрытого) бокса испытательного стенда показано, что при наличии отрывного характера течения в боксе величина поправки на входной импульс существенно увеличивается.

Ключевые слова: испытательный стенд, испытательный бокс, газотурбинный двигатель, аэродинамическая аттестация, сила тяги двигателя, поправка на входной импульс.

Determination of the input pulse value as an amendment to the force from GTE thrust in the test facility (closed) box

Klinskiy B.M.

CIAM, Moscow

The paper reviews the problems of determining the value of the input pulse as an amendment to the measured thrust force for the engine with the attached input lemniscate nozzle in the test facility (closed) box. The technique is proposed for estimating the input pulse value, based on determining the difference in the thrust values of the lemniscate nozzle. These values differ when operation conditions change from condition in infinite space (equivalent to working a nozzle on a standard open facility) to conditions in a limited space of a test facility box. Analysis of the results of aerodynamic certification of the test facility (closed) box is shown that in the presence of detached flows in the box, the correction for the input pulse to the thrust force increases significantly.

Keywords: test facility, test box, gas turbine engine, aerodynamic certification, engine thrust, input pulse amendment.

Введение

При испытаниях ГТД в (закрытом) испытательном боксе стенда измеренная сила от тяги двигателя будет меньше тяги двигателя из-за влияния входного импульса и внешнего аэродинамического сопротивления ГТД и его коммуникаций, возможного разрежения в области реактивного сопла, возможного неравенства полного давления на входе в двигатель и статического давления в боксе и изменения при этом режима работы двигателя в случае докритического режима истечения газов из реактивного сопла.

Горизонтальная составляющая тяги двигателя $R_{дв}$ при испытании в (закрытом) боксе стенда определяется по формуле:

$$R_{дв} = R_{сис} + \Delta R_{\Sigma} = R_{сис} + (\Delta R_{ву} + \Delta R_{пар} + \Delta R_p + \Delta R_c + \Delta R_{\pi}),$$

где $R_{сис}$ – горизонтальная сила от тяги ГТД, измеряемая силоизмерительной системой стенда (СИС); ΔR_{Σ} – суммарная поправка на влияние аэродинамики испытательного бокса на силу от тяги ГТД. В состав ΔR_{Σ} входят следующие компоненты: $\Delta R_{ву}$ – поправка на входной импульс; $\Delta R_{пар}$ – поправка от аэродинамического сопротивления двигателя, коммуникаций и стендового

оборудования, размещенных на динамометрической платформе СИС; ΔR_p – поправка от разрежения в зоне реактивного сопла двигателя при эжектировании воздуха из бокса в выхлопную трубу стенда (может быть сведена к нулю путем выбора необходимого расстояния от среза реактивного сопла до входа в эжектор); $\Delta R_c = F_c (P_6^* - P_{вх}^*)$ – поправка на неравенство полного давления $P_{вх}^*$ на входе в двигатель и статического давления P_6 в плоскости реактивного сопла вне газовой струи (применима при степени понижения давления в критическом сечении сопла выше критической величины: $\pi_c^* \geq \pi_{c,кр}^*$); ΔR_π – поправка на изменение режима работы двигателя при $P_{вх}^*/P_6^* \neq 1,0$ и $\pi_c^* < \pi_{c,кр}^*$.

Для ГТД с удельной тягой 700...1100 Н·с/кг при скорости воздуха в боксе стенда 7,0...7,5 м/с величина поправки $\Delta R_{вх} + \Delta R_{пар}$ обычно не превышает 0,8...1,5% тяги двигателя. Определение такой величины поправки путем сравнения измеренных усилий на станке эталонного открытого и закрытого стендов затруднительно, так как величина поправки соизмерима с погрешностью способа.

Поправка $\Delta R_{пар}$, составляющая небольшую долю от суммарной аэродинамической поправки, может быть определена с использованием известных значений коэффициентов лобового сопротивления C_x элементов конструкции, размещенных в боксе на динамометрической платформе. Поправка $\Delta R_{вх}$, как показали экспериментальные исследования ЦИАМ, может быть оценена расчетным путем.

Методика определения поправки на входной импульс $\Delta R_{вх}$ к стендовой тяге ГТД типа ТРД и ТРДД в (закрытом) боксе испытательного стенда представлена в настоящей работе. Методика основана на определении разности величин тяги лемнискатного насадка входного устройства при переходе от условий его работы в бесконечном пространстве, эквивалентных работе насадка на эталонном открытом стенде, к условиям работы в ограниченном пространстве закрытого бокса испытательного стенда.

Отметим, что действующая нормативно-техническая база «для определения влияния аэродинамики стенда на силу от тяги ГТД, испытываемых на закрытых стендах» согласно п. 6.8 в ОСТ 101021-93 [1] недостаточна для обеспечения испытаний ТРДД с большой степенью двухконтурности, в том числе с отдельными контурами, поскольку:

– рекомендуемый для этой цели ОСТ 102781-2004 [2] применим только для «ТРД и ТРДД с общим соплом при степенях понижения давления в сопле выше критических»;

– указание в п. 6.8 ОСТ 101021-93 об использовании для двигателей, не подпадающих под область применения ОСТ 102781-2004, «Методики»

не корректно, так как эта методика не устанавливает требований на испытания ГТД с отношением давлений $P_{вх}^*/P_6^* \neq 1,0$.

В упомянутых выше ОСТ 102781-2004, методике выполнения измерений (МВИ) «Сила аэродинамическая при испытаниях газотурбинных двигателей на наземных закрытых стендах» и «Методике» также отсутствует методика оценки погрешности определения аэродинамической силы, хотя ГОСТ Р 8.563-96 устанавливает общие положения и требования к МВИ как к совокупности операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с известной точностью.

Методика определения поправки на входной импульс

Рассмотрим апробированный способ определения поправки на входной импульс $\Delta R_{вх}$ к силе от тяги двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД).

Входной импульс потока в испытательном (закрытом) боксе уменьшает тягу входного устройства двигателя на величину $\Delta R_{вх} = R_{вх\infty} - R_{вх}$, где $R_{вх\infty}$ – тяга входного устройства двигателя при отсутствии входного импульса (на открытом стенде в условиях неограниченного пространства); $R_{вх}$ – тяга входного устройства двигателя при его испытании в боксе при входном импульсе $I = G_1 \cdot v_6 \neq 0$ (G_1 – расход воздуха через двигатель; v_6 – скорость в боксе перед двигателем).

В работе [3] было рассмотрено влияние входного импульса потока в различных испытательных боксах на величину тяги входного устройства в сравнении с тягой на открытом стенде и сформулировано выражение для величины потери тяги:

$$\Delta \bar{R}_{вх} = (R_{вх\infty} - R_{вх}) / R_{вх\infty}$$

В результате проведенных А.Н. Тимошиным экспериментальных исследований [3] на моделях бокса с измерением тяги лемнискатного насадка было установлено, что:

– влияние входного импульса на величину потери тяги $\Delta \bar{R}_{вх}$ зависит от относительного размера бокса \bar{F} , относительного расхода воздуха через бокс $n = G_2 / G_1$ (коэффициент эжекции) и структуры потока в боксе перед входным устройством;

– для равномерного потока в боксе величина $\Delta \bar{R}_{вх}$ уменьшается с увеличением относительного размера бокса \bar{F} ;

– для бокса с верхней всасывающей шахтой величина $\Delta \bar{R}_{вх}$ зависит от расстояния \bar{l}_p между всасывающей шахтой и входным устройством, расстояние \bar{l}_p практически не влияет на величину $\Delta \bar{R}_{вх}$ при $\bar{l}_p \geq 1,8...2$.

Также в работе [3] было показано, что влияние всасывающего воздействия входного устройства ГТД сказывается только на определенной длине и при $\bar{I}_p \geq 1,8 \dots 2$ входное устройство не оказывает влияния на течение в боксе.

Расчетная схема к определению поправки на входной импульс показана на рис. 1. Расчетные соотношения получены для общего случая неравномерного поля скоростей воздуха в боксе перед двигателем.

Принято, что в боксе перед двигателем равномерная по площади F_1 скорость потока имеет величину $v_1 = G_1 / (\rho F_1)$, где G_1 – расход воздуха через двигатель в сечении «А-А» (см. рис. 1). Относительная величина скорости $\bar{v}_1 = v_1 / v_6$, где v_6 – средняя скорость потока в боксе в сечении «А-А».

Скорость обдувающего потока v_2 также принята равномерной по площади сечения $F_2 = F_6 - F_1$:

$$v_2 = (G_2 - G_1) / \rho F_2 = G_2 / \rho F_2.$$

Уравнение закона сохранения количества движения для сечений «А-А» и «В-В» имеет вид:

$$G_1 v_1 + G_2 v_2 + P_6 F_6 = G_2 v_3 + G_1 v_0 + P_0 f_0 + P_3 (F_6 - f_0) - R_{\text{вы}}, \quad (1)$$

Тяга входного устройства открытого стенда:

$$R_{\text{вы}\infty} = G_1 v_0 - f_0 (P_1^* - P_0). \quad (2)$$

Используя разложения

$$f_0 (P_3 - P_0) = f_0 (P_1^* - P_0) - f_0 (P_1^* - P_3);$$

$$G_1 v_0 - f_0 (P_3 - P_0) = R_{\text{вы}\infty} + f_0 (P_1^* - P_3),$$

преобразуем соотношение (1) к виду:

$$R_{\text{вы}\infty} - R_{\text{вы}} = G_1 v_1 + G_2 (v_2 - v_3) - F_6 (P_3 - P_6) - f_0 (P_1^* - P_3). \quad (3)$$

Здесь G_1 , v_1 и F_1 – расход, скорость и проходная площадь первичного потока, входящего во входное устройство, в сечении «А-А»; G_2 , v_2 и F_2 – расход,

скорость и площадь вторичного обдувающего потока в сечении «А-А»; v_3 и P_3 – скорость и давление обдувающего потока в сечении «В-В»; $P_1^* = P_6 + (\rho v_1^2) / 2$ – полное давление первичного потока.

Учитывая следующие соотношения и допущения

$$F_1 + F_2 = F_6; \quad \bar{v}_1 = v_1 / v_6; \quad n = G_2 / G_1; \quad P_6 = P_1;$$

$$\frac{F_1}{F_6} = \frac{1}{\bar{v}_1(1+n)}; \quad \frac{F_2}{F_6} = \frac{1}{\bar{v}_1(1+n)-1}; \quad v_2 = \frac{nv_1}{\bar{v}_1(1+n)-1},$$

окончательно получаем:

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{вы}} = R_{\text{вы}\infty} - R_{\text{вы}} = & G_1 v_6 \bar{v}_1 + n G_1 \frac{v_6 \bar{v}_1 n}{\bar{v}_1(1+n)-1} \left[1 - \frac{1}{1 - \frac{1}{\bar{v}_1(1+n)}} \right] \\ & - F_6 (P_3 - P_6) - f_0 (P_1^* - P_3). \end{aligned} \quad (4)$$

Последний член соотношения (4) мал и им можно пренебречь.

Соотношение (4) по данным измерений поля скорости в боксе в сечении «А-А» и перепада давления $P_3 - P_6$ позволяет определить поправку $\Delta R_{\text{вы}}$ и ее относительную величину $\Delta \bar{R}_{\text{вы}} = (\Delta R_{\text{вы}} / R) \cdot 100\%$. Влияние неравномерности поля скорости в боксе перед двигателем на $\Delta R_{\text{вы}}$ можно определить, варьируя величину \bar{v}_1 .

При такой оценке предполагается, что полное давление вторичного потока на участке между сечениями «А-А» и «В-В» остается неизменным. Тогда

$$P_3 - P_6 = \rho_6 (v_2^2 - v_3^2) / 2, \quad \text{где } v_3 = \frac{v_6 n}{(1 - F_{\text{вх}} / F_6)(1+n)}.$$

По представленным формулам проведен расчет для следующих исходных данных: $F_6 / f_0 = 105,7$; $F_{\text{вх}} = 1,94 \text{ м}^2$; $n = 4,3$; $\rho_6 = 1,2 \text{ кг/м}^3$; $v_6 = 7,23 \text{ м/с}$; $R_0 = 76,585 \text{ кН}$ на «максимальном» режиме; диапазон изменения $\bar{v}_1 = 1,0 \dots 1,3$. Результаты расчета приведены в табл. 1.

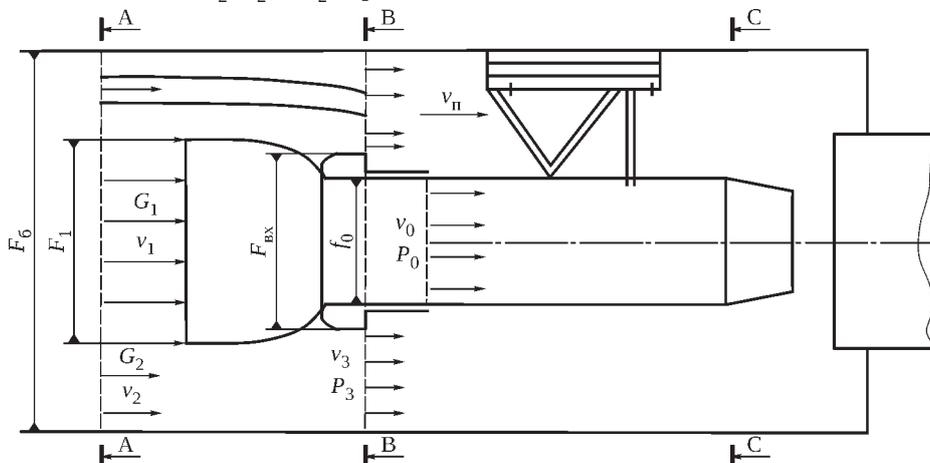


Рис. 1. Расчетная схема к определению поправки на входной импульс

Таблица 1. Результаты тестового расчета

\bar{v}_1	1,0	1,1	1,2	1,3
v_1 , м/с	7,23	7,95	8,68	9,40
$G_1 v_6 \bar{v}_1$, Н	805	885	965	1046
$n G_1 (v_2 - v_3)$, Н	579	497,7	440	393,8
$P_3 - P_6$, Па	9,60	8,18	7,17	6,30
$F_6 (P_3 - P_6)$, Н	652,8	556	487	428
$\Delta R_{\text{вы}}$, Н	731	826,7	918	1012
$\Delta \bar{R}_{\text{вы}}$, % («максимал»)	0,95	1,08	1,20	1,32

При равномерной скорости в боксе ($\bar{v}_1 = 1,0$) поправка $\Delta \bar{R}_{\text{вы}}$ на влияние входного импульса составляет 0,95% на «максимальном» режиме работы двигателя. При увеличении неравномерности поля скоростей \bar{v}_1 в сечении «А-А» потеря тяги $\Delta R_{\text{вы}}$ входного устройства двигателя увеличивается, что было подтверждено экспериментальными исследованиями ЦИАМ. На «максимальном» режиме при изменении неравномерности скорости потока \bar{v}_1 от 1,0 до 1,3 потеря тяги $\Delta R_{\text{вы}}$ увеличивается на 39%.

При безотрывном течении в боксе перепад давления $P_3 - P_1 > 0$, и третий член выражения (4) уменьшает величину поправки $\Delta R_{\text{вы}}$. При наличии отрывного характера течения в боксе, когда $P_3 < P_1$, по результатам исследований ЦИАМ величина поправки $\Delta R_{\text{вы}}$ в 1,4...2 раза больше величины $\Delta R_{\text{вы}}$ при безотрывном течении.

Поправка о потере тяги $\Delta R_{\text{вы}}$ по данным измерений определяется следующим образом (см. рис. 1).

1. Определяется расход воздуха в боксе перед двигателем:

$$G_{\Sigma} = \rho_6 (F_1 v_1' + F_2 v_2' + \dots + F_{25} v_{25}') = \frac{\rho_6 F_6}{25} \sum_1^{25} v_i'$$

где $\rho_6 = P_6 / (R_v T_6)$ – плотность воздуха в боксе; v_i' – скорости, измеренные в центрах равновеликих площадей $F_1' = F_2' = \dots = F_{25}'$.

2. Определяется средняя скорость потока в боксе

$$v_6 = G_{\Sigma} / \rho_6 F_6 = \sum_1^{25} v_i' / 25.$$

3. По измеренному полю скорости перед двигателем определяется площадь F_1 . Для этого задается площадь $F = G_1 / (\rho_6 v_6)$ с центром на оси двигателя, которая разбивается на несколько (не менее 10) колец. В каждом кольце по четырем значениям измеренных скоростей определяется средняя скорость $v_{\text{ср}i} = 0,25(v_1' + v_2' + v_3' + v_4')$ и расход $G_{\text{ср}i} = \rho_6 f_i v_{\text{ср}i}$, где f_i – площадь кольца. Далее определяется такая площадь F_1 , через которую проходит расход

$$G_1 = \sum_{i=1}^N \rho_6 f_i v_{\text{ср}i}.$$

4. Определяется средняя скорость первичного потока $v_1 = G_1 / (\rho_6 F_1)$.

5. Вычисляется относительная скорость $\bar{v}_1 = v_1 / v_6$.

6. Определяется проходная площадь вторичного обдувающего потока в сечении «А-А» $F_2 = F_6 - F_1$.

7. Вычисляется расход обдувающего потока $G_2 = G_{\Sigma} - G_1$.

8. Определяется величина относительного расхода в боксе $n = G_2 / G_1$.

9. Вычисляется средняя скорость обдувающего потока в сечении «А-А» $v_2 = G_2 / (\rho_6 F_2)$.

10. Вычисляется средняя скорость обдувающего потока в сечении «В-В» $v_3 = G_2 / \rho_6 (F_6 - F_{\text{вх}})$.

11. Определяется расчетная величина перепада давления $(P_3 - P_6)_{\text{расч}} = \rho_6 (v_2^2 - v_3^2) / 2$.

12. Определяется экспериментально измеренная величина перепада давления $P_3 - P_6$.

13. Вычисляется поправка на влияние входного импульса $\Delta R_{\text{вы}}$ из соотношения (4).

14. Определяется относительная величина поправки $\Delta \bar{R}_{\text{вы}} = (\Delta R_{\text{вы}} / R) \cdot 100\%$, где R – стендовая тяга двигателя на исследуемом режиме.

Основные результаты

По описанной выше методике проведены исследования аэродинамических характеристик нового Ш-образного бокса испытательного стенда с вертикальными основной всасывающей шахтой с шумоглушением, дополнительной всасывающей шахтой для подпитки эжекторной газоотводящей трубы и выхлопной шумоглушающей шахтой (рис. 2).

Схема размещения анемометров и приемников статического давления в испытательном боксе стенда с установленным на верхней подвеске ГТД показана на рис. 3.

Содержание аэродинамических исследований бокса стенда включало:

- определение действительной неравномерности поля скорости воздуха в боксе перед двигателем;
- определение средней скорости воздуха перед двигателем;
- измерение продольного распределения статического давления в боксе;
- определение скорости воздуха в боксе в зоне подвески двигателя;
- определение потерь полного давления в боксе;
- проверка на наличие возвратных течений газа в боксе;
- определение влияния эжектора на давление вблизи среза сопла двигателя;
- проверка достаточности охлаждения выхлопных газов.

В связи с этим были проведены исследования:

- поля скоростей потока в сечении бокса перед двигателем (сечение «А-А» на рис. 3) путем измерения скорости с помощью анемометров, расположенных в 25 точках этого сечения;
- средней скорости воздуха перед двигателем;
- распределения давления в боксе, включая измерение перепадов ($P_1 - P_2$), ($P_1 - P_3$) и ($P_2 - P_4$);
- скорости потока в зоне подвески двигателя;

– разрежения в боксе $P_a - P_1$ относительно атмосферного давления P_a .

Для измерений перепадов давлений использовались:

- 1) $\Delta P_{0-1} = B_0 - P_1$: датчик с диапазоном измерения 0...500 Па и погрешностью измерения $\pm 0,05\%$ ВП;
- 2) $\Delta P_{1-3} = P_1 - P_3$: датчик с диапазоном измерения 0...100 Па и погрешностью измерения $\pm 0,5\%$ ВП;
- 3) $\Delta P_{1-2} = P_1 - P_2$: датчик с диапазоном измерения 0...200 Па и погрешностью измерения $\pm 0,5\%$ ВП;

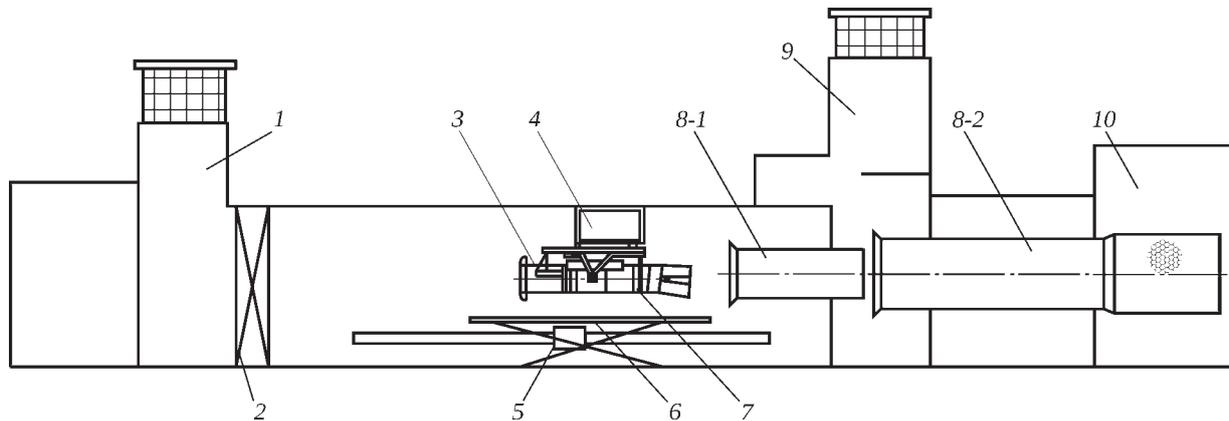


Рис. 2. Компоновка нового бокса испытательного стенда с дополнительной всасывающей шахтой: 1 – всасывающая шахта с шумоглушением; 2 – шумоглушающие панели; 3 – входное устройство; 4 – моторная рама с силоизмерительным устройством; 5 – устройство для подъема настила; 6 – настил для обеспечения монтажных работ; 7 – испытываемый двигатель; 8-1 и 8-2 – первая и вторая ступень эжекторной трубы; 9 – дополнительная всасывающая шахта с шумоглушением; 10 – выхлопная шахта с шумоглушением

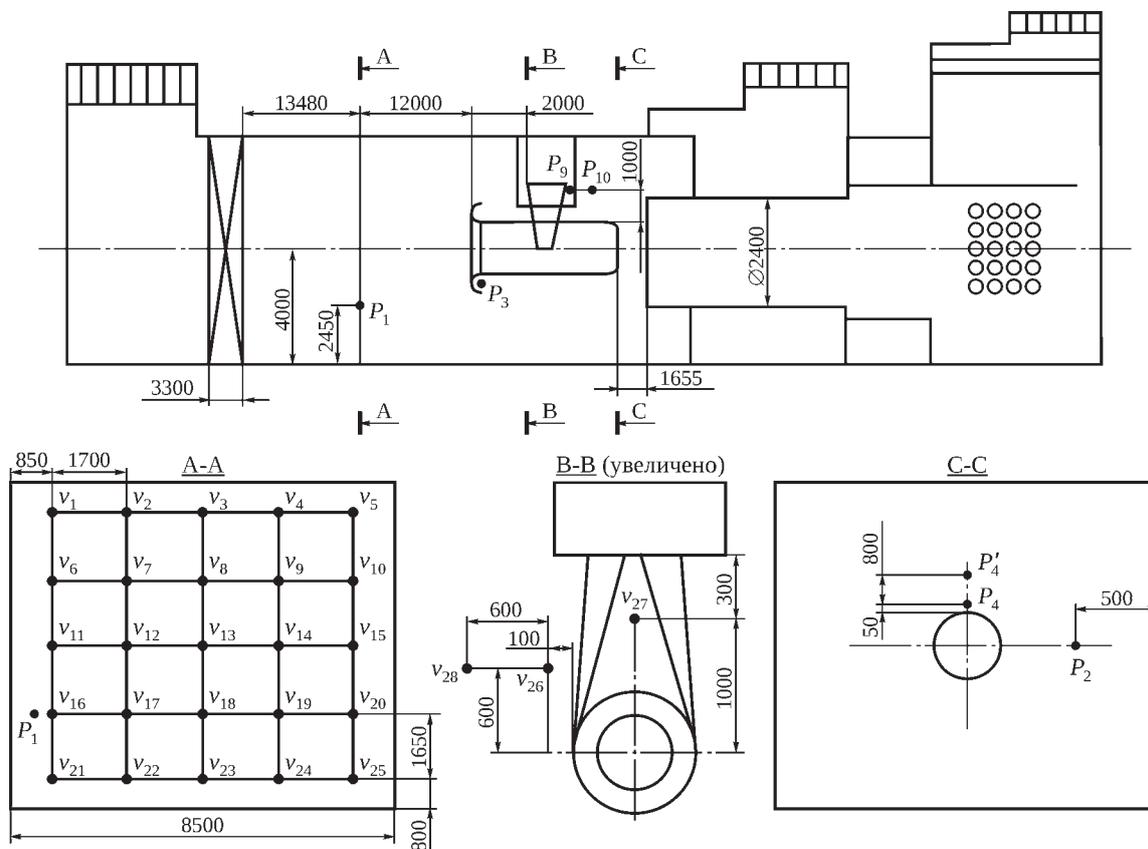


Рис. 3. Схема размещения анемометров и приемников статического давления в испытательном боксе стенда

4) $\Delta P_{2-4} = P_2 - P_4$: датчик с диапазоном измерения 0...200 Па и погрешностью измерения $\pm 0,5\%$ ВП;

5) $\Delta P_{9-10} = P_9 - P_{10}$: датчик с диапазоном измерения 0...200 Па и погрешностью измерения $\pm 0,5\%$ ВП.

В качестве эталона использовался грузопоршневой манометр с диапазоном измерения 0...500 Па и с погрешностью $\pm 0,05\%$ ВП.

Фактические перепады давления, например, ΔP_{1-3} , при проведении аэродинамических исследований составили не более 7 Па. Таким образом, измерение некоторых перепадов давлений производилось с высокой погрешностью. Для этой цели необходимо использовать эталонный датчик с диапазоном измерения 0...50 Па и пределом допускаемой основной погрешности $\pm 0,02\%$, а в качестве рабочего датчика измерения ΔP_{1-3} использовать датчик с диапазоном измерения 0...20 Па и погрешностью $\pm 0,05\%$.

Необходимо также указать на высокую погрешность измерения скорости потока в контрольном сечении «А-А» бокса с помощью анемометров. На максимальных режимах работы ГТД только основная погрешность измерения скорости потока составляет не менее $\pm 4\%$ вместо рекомендуемой погрешности $\pm 1\%$.

Измерения аэродинамических характеристик бокса стенда производились на трех установившихся режимах работы двигателя: «максимальный» (режим «М»); 0,9 режима «М»; «земной малый газ».

Основные результаты аэродинамической аттестации испытательного бокса стенда приведены далее.

1. Максимальное разрежение давления в боксе стенда при испытании двигателя на «максимальном» режиме составило $P_0 - P_1 \approx 300$ Па, что соответствует норме. Результаты измерения продольных распределений статического давления приведены в табл. 2.

2. Средняя (по данным 25 анемометров) скорость потока воздуха в сечении перед испытываемым двигателем на «максимальном» режиме составила $v_{cp} = 7,35$ м/с (рис. 4). Результаты измерений скорости потока с помощью 25 анемометров перед входом в двигатель и трех анемометров в районе подвески двигателя на режимах «максимальный» и «земной малый газ» приведены в табл. 3 и табл. 4.

Таблица 2. Измеренные перепады статического давления

$P_0 - P_1$, Па	$P_1 - P_3$, Па	$P_2 - P_4$, Па	$P_1 - P_2$, Па	$P_9 - P_{10}$, Па	$n_{нд пр}$, %	$n_{вд пр}$, %
140,2	4,07	93,0	11,43	-0,7	75,13	97,24
165,0	0,31	102,1	8,79	-0,2	80,21	88,20
202,0	0,66	105,0	10,04	0,5	84,25	88,97
262,0	7,20	110,5	17,72	1,2	90,02	94,13
298,3	5,67	112,0	16,86	7,0	94,17	97,54
299,8	6,57	112,0	18,30	4,0	95,30	98,34
302,5	5,18	114,1	15,83	6,55	96,41	99,01
302,5	6,59	114,5	19,37	5,85	97,06	99,40

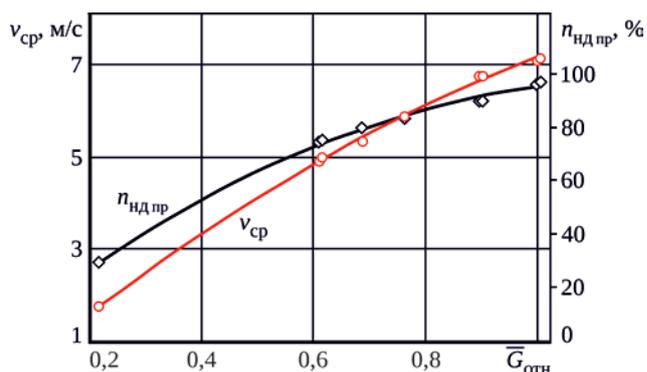


Рис. 4. Зависимость средней измеренной величины скорости потока в сечении бокса перед двигателем от относительной величины расхода воздуха через двигатель в условиях $H = 0$, $M = 0$

Средняя максимальная абсолютная скорость потока воздуха на входе в двигатель была отмечена на уровне $v_{cp max} \approx 11$ м/с, максимальное значение скорости потока на «максимальном» режиме работы двигателя составило не выше 13 м/с (см. табл. 3). Полученные значения средних скоростей потока воздуха в сечении перед испытываемым двигателем на «максимальном» режиме не превышают норму для наземных боксов $v_{cp max} \leq 15$ м/с.

3. Максимальные скорости потока в боксе в зоне подвески двигателя по показаниям анемометров v_{26} , v_{27} и v_{28} составили соответственно 6,95, 4,33 и 7,50 м/с (табл. 3), что можно признать удовлетворительным.

4. Отсутствие возвратных течений (рециркуляции) в боксе в районе первой ступени эжектора с диаметром входа 2,4 м вследствие достаточного коэффициента эжекции $n = 4...4,3$ было подтверждено:

- визуализацией течения струек тока потока вблизи стендового выхлопного устройства посредством телевизионного контроля за ленточками, размещенными в зоне всасывания первой ступени эжектора;

- сравнительным анализом распределения заторможенной температуры воздуха перед входом в двигатель по данным приемников, установленных на входной защитной сетке.

5. Влияние эжектора на давление вблизи среза сопла двигателя незначительно: максимальное разрежение давления на расстоянии примерно 50 мм от створок выходного сечения реактивного сопла, расположенного на расстоянии 1600...1700 мм от входа в первую ступень эжектора (см. рис. 3), на «максимальном» режиме работы составило 100...110 Па.

6. Неравномерность поля скоростей во входном сечении бокса (сечение «А-А» на рис. 3), определяемая отношением

$$\Delta \bar{v} = (v_{max} - v_{min}) / v_{cp} \cdot 100\%,$$

достигает величины 97% на «максимальном» режиме работы, что выше нормированного значения 50%.

Повышенный уровень неравномерности скорости потока сохраняется до режима «земной малый газ» (см. табл. 4).

Значительный уровень неравномерности и нестационарности воздушного потока во входном устройстве испытательного бокса в основном вызван отсутствием направляющих решеток за воздухозаборной шахтой и выравнивающих сеток на основном участке бокса перед входным устройством двигателя. Установленных шумоглушающих панелей недостаточно для получения требуемой равномерности поля скоростей потока воздуха в сечении «А-А» бокса.

7. Определение величины входного импульса.

На «максимальном» режиме ($n_{\text{НД пр}} = 97,06\%$, $n_{\text{ВД пр}} = 99,40\%$) величина перепада давления

Таблица 3. Результаты измерений скорости воздуха в боксе с помощью 25 анемометров перед входом в двигатель и трех (№ 26–28) анемометров в районе подвески двигателя на «максимальном» режиме работы при $n_{\text{НД пр}} = 97,06\%$

№ анемометра	$v'_{\text{cp } i}, \text{ м/с}$	$v'_{i \text{ max}}, \text{ м/с}$	$v'_{i \text{ min}}, \text{ м/с}$
1	8,45	10,46	6,92
2	6,35	7,94	4,92
3	3,72	4,99	2,72
4	4,86	6,56	2,99
5	7,49	8,75	6,29
6	8,35	9,53	6,77
7	6,33	7,55	5,06
8	5,40	7,08	3,85
9	6,35	8,62	4,56
10	7,84	10,03	5,80
11	6,90	8,11	5,66
12	8,55	10,08	7,10
13	9,20	10,80	7,43
14	8,26	9,78	6,71
15	7,68	9,52	5,60
16	6,10	7,46	4,53
17	9,36	10,47	7,95
18	7,41	8,64	6,45
19	7,23	8,44	5,88
20	5,15	5,81	4,51
21	6,24	7,20	5,30
22	10,57	12,92	8,00
23	10,27	12,73	7,03
24	9,34	10,80	7,72
25	6,24	7,20	5,30
26	5,08	6,95	3,36
27	3,29	4,33	2,41
28	6,11	7,50	4,65

$P_1 - P_3 \approx 6,59$ Па (см. табл. 2), т.е. в боксе реализуется отрывной режим течения.

Поправку $\Delta R_{\text{вы}}$ для отрывного течения необходимо определять по соотношению (4), подставляя в него измеренный перепад $P_3 - P_1$. Третий член соотношения (4) при этом будет положительным, увеличивая поправку $\Delta R_{\text{вы}}$.

Отрывной режим течения на входном участке испытательного бокса и повышенный уровень неравномерности скорости потока в основном объясняются отсутствием направляющих лопаток в верхней части поворотного колена передней всасывающей шахты стенда, что приводит к увеличению поправки на входной импульс по сравнению со случаем безотрывного течения в боксе.

Таблица 4. Результаты измерений скорости воздуха в боксе с помощью 25 анемометров перед входом в двигатель и трех (№ 26–28) анемометров в районе подвески двигателя на режиме работы «земной малый газ» при $n_{\text{ВД пр}} = 70,59\%$

№ анемометра	$v'_{\text{cp } i}, \text{ м/с}$	$v'_{i \text{ max}}, \text{ м/с}$	$v'_{i \text{ min}}, \text{ м/с}$
1	2,34	3,03	1,79
2	2,27	3,00	1,63
3	1,50	2,34	0,88
4	1,22	1,63	0,78
5	1,21	1,53	0,85
6	1,42	2,09	0,94
7	1,61	2,08	1,29
8	1,52	2,05	1,14
9	1,66	2,29	1,27
10	2,30	2,77	1,85
11	1,55	1,87	1,20
12	1,92	2,55	1,27
13	1,83	2,74	1,07
14	2,12	2,63	1,53
15	1,82	2,25	1,30
16	1,72	2,19	1,28
17	2,07	2,43	1,73
18	1,91	2,22	1,43
19	1,96	2,29	1,67
20	1,61	1,89	1,39
21	1,61	1,92	1,35
22	3,08	4,06	2,09
23	2,50	3,11	1,86
24	2,61	3,01	2,27
25	1,61	1,92	1,35
26	1,60	2,02	1,19
27	0,81	0,95	0,69
28	1,81	2,15	1,54

Общий расход воздуха через бокс

$$G_{\Sigma} = \rho F_6 v_{cp} = 1,2 \cdot 68 \cdot 7,35 = 599,7 \text{ кг/с};$$

коэффициент эжекции бокса

$$n = G_2 / G_1 = (G_{\Sigma} - G_1) / G_1 = 4,39;$$

$$v_1 = 7,56 \text{ м/с}; F_1 = 12,26 \text{ м}^2; \bar{v}_1 = 7,56 / 7,35 = 1,03.$$

Входной импульс от расхода G_1 (первый член соотношения (4)):

$$G_1 \cdot v_{cp} \cdot \bar{v}_1 = 111,3 \cdot 7,35 \cdot 1,03 = 842,6 \text{ Н}.$$

Второй член соотношения (4)

$$n G_1 \frac{v_{cp} \bar{v}_1 n}{\bar{v}_1 (1+n) - 1} \left[1 - \frac{1}{\bar{v}_1 (1+n)} \frac{1}{1 - F_{вх} / F_6} \right] =$$

$$= 4,39 \cdot 111,3 \frac{7,35 \cdot 1,03 \cdot 4,39}{1,03 \cdot (1 + 4,39) - 1} [0,1565] \approx 558 \text{ Н}.$$

Третий член соотношения (4):

$$-F_6 \cdot (P_3 - P_1) = 68 \cdot 6,59 = 448 \text{ Н}.$$

Таким образом, абсолютная поправка на входной импульс составляет:

$$\Delta R_{vy} = 842,6 + 558 + 448 \approx 1849 \text{ Н}.$$

Относительная поправка на входной импульс (без учета величины $\Delta R_{пар}$, которая согласно проведенной оценке составляет всего 0,04% стеновой тяги двигателя) на «максимальном» режиме работы двигателя составляет:

$$\Delta \bar{R}_{vy} = (\Delta R_{vy} / R) \cdot 100 = (1849 / 76585) \cdot 100 = 2,4\%.$$

Для безотрывного течения потока в боксе при $\bar{v}_1 = 1,2$ величина относительной поправки $\Delta \bar{R}_{vy} \approx 1,2\%$.

Оценим погрешность определения найденной поправки входного импульса ΔR_{vy} к измеренной силе от тяги двигателя.

Для косвенно измеряемой величины ΔR_{vy} суммарная погрешность при отсутствии неисключенных систематических погрешностей может быть определена согласно [4]:

$$\delta \Delta R_{vy} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (K_{xi} \delta \varepsilon(x_i))^2},$$

где $K_{xi} = \frac{\partial \Delta R_{vy}}{\partial x_i} \frac{x_i}{\Delta R_{vy}}$ – коэффициенты влияния независимых измеряемых величин x_i ; $\delta \varepsilon(x_i)$ – относи-

Таблица 5. Значения коэффициентов влияния и относительные величины суммарной случайной погрешности измерения независимых величин x_i

x_i	Коэффициент влияния	$\delta \varepsilon(x_i)$, %
G_1	$K_{G1} = 1,129$	$\pm 0,5$
v_1	$K_{v1} = 1,129$	$\pm 1,0$
G_2	$K_{G2} = 0,819$	$\pm 2,12$
v_2	$K_{v2} = 4,856$	$\pm 1,0$
v_3	$K_{v3} = -4,037$	$\pm 2,42$
F_6	$K_{F6} = -0,929$	$\pm 1,0$
ΔP_3	$K_{\Delta P3} = -0,020$	$\pm 0,05$
f_0	$K_{f0} = -0,020$	$\pm 0,1$
ρ_6	$K_{\rho6} = -0,028$	$\pm 0,17$

тельная величина суммарной случайной погрешности измерения независимой величины x_i .

Дифференцированию подвергается функция

$$\Delta R_{vy} = G_1 v_1 + G_2 (v_2 - v_3) + F_6 \Delta P_3 - f_0 \left(\frac{\rho_6 v_1^2}{2} + \Delta P_3 \right).$$

При этом

$$\delta G_2 = \sqrt{(\delta \rho_6)^2 + (\delta F_2)^2 + (\delta v_2)^2};$$

$$\delta v_3 = \sqrt{(\delta G_2)^2 + (\delta \rho_6)^2 + \left(\frac{F_6}{F_6 - F_{вх}} \right)^2 \left((\delta F_6)^2 + (\delta F_{вх})^2 \right)};$$

$$\delta \rho_6 = \sqrt{(\delta P_6)^2 + (\delta T_1^*)^2}.$$

Значения коэффициентов влияния и относительные величины суммарной случайной погрешности измерения независимых величин x_i приведены в табл. 5.

С учетом указанных допущений суммарная инструментальная погрешность определения поправки входного импульса $\delta \Delta R_{vy}$ при использовании современных высокоточных средств и исключении систематических погрешностей может составить $\pm 11,14\%$.

Наибольшее влияние на погрешность измерения оказывают параметры прямого измерения скорости вторичного потока v_2 с помощью анемометров ($K_{v2} = 4,856$) и косвенно определяемой скорости потока v_3 ($K_{v3} = -4,037$).

В случае уменьшения суммарной погрешности определения величины v_3 от $\pm 2,42\%$ до $\pm 1\%$, погрешность определения поправки на входной импульс может быть уменьшена до $\pm 6,72\%$.

Заключение

1. Разработана методика определения величины входного импульса в качестве поправки к измеренной силе от тяги испытываемых двигателей в компоновке с присоединенным входным лемнискатным насадком в (закрытых) боксах испытательных стендов. Методика основана на определении разности величин тяги лемнискатного насадка входного устройства при изменении его работы при переходе от условий работы в бесконечном пространстве, эквивалентных работе насадка на эталонном открытом стенде, к условиям работы в ограниченном пространстве (закрытого) бокса испытательного стенда. Разработанная методика не зависит от типа ГТД (ТРД, ТРДД), режима работы сопла (сопел) и учитывает влияние неравномерности распределения поля скоростей потока в боксе перед входным устройством испытываемого двигателя и характер течения в боксе (отрывной или безотрывной).

2. Оценка суммарной инструментальной погрешности определения поправки на входной импульс к измеренной силе от тяги одного типа двигателя применительно к (закрытому) боксу испытательного стенда показала, что с учетом использования современных высокоточных средств и при исключении систематических погрешностей независимых измеряемых параметров погрешность определения поправки на входной импульс $\delta\Delta R_{\text{вх}}$ составит $\pm 11,14\%$. Наибольшее влияние на погрешность измерения оказывают параметры прямого измерения скорости потока v_2 с помощью анемометров (коэффициент влияния $K_{v_2} = 4,856$) и косвенно определяемой скорости потока v_3 ($K_{v_3} = -4,037$). В случае уменьшения суммарной погрешности определения скорости v_3 с $\pm 2,42\%$ до $\pm 1,0\%$, погрешность определения входного импульса может быть уменьшена до $\pm 6,72\%$. При умеренных величинах относительной поправки по входному импульсу $\Delta\bar{R}_{\text{вх}} = 0,74 \dots 1,2\%$, которые соответствуют случаю безотрывного течения потока в боксе, погрешность определения поправки $\delta\Delta R_{\text{вх}} \approx \pm 10\%$ может быть достаточна для современной стендовой силовой измерительной системы по ОСТ 102512, чтобы обеспечить суммарную погрешность определения «тяги двигателя» не выше $\pm 0,3\%$ ИЗ в диапазоне $0,5R_{\text{о.пр}} \dots R_{\text{о.пр}}$ согласно ОСТ 101021-93.

3. Методика определения величины входного импульса апробирована при проведении аэродинамической аттестации (закрытого) бокса испытательного стенда с ТРДД выбранного типа. Показано, что при наличии отрывного характера течения потока в боксе стенда величина поправки на входной импульс

к стендовой силе от тяги существенно увеличивается. Получено:

- максимальное разряжение давления в боксе стенда при испытании двигателя на максимальном режиме составляет 300 Па, что соответствует норме;

- средние максимальные скорости потока воздуха в сечении установки 25 анемометров перед испытываемым двигателем не превышают норму $v_{\text{ср max}} \leq 15$ м/с; средняя скорость потока на «максимальном» режиме $v_{\text{ср}} = 7,35$ м/с;

- максимальные скорости потока в боксе в зоне подвески двигателя по показаниям трех анемометров составили 6,95, 4,33 и 7,50 м/с, соответственно, что можно признать удовлетворительным;

- отсутствие возвратных течений газа (рециркуляции) в боксе в районе первой ступени эжектора с диаметром входа 2,4 м вследствие достаточного коэффициента эжекции $n = 4 \dots 4,3$;

- влияния эжектора на давление вблизи среза сопла двигателя незначительно (максимальное разряжение давления на расстоянии примерно 50 мм от створок выходного сечения реактивного сопла, расположенного на расстоянии 1600...1700 мм от входа в первую ступень эжектора, на максимальном режиме работы составило 100...110 Па);

- неравномерность поля скоростей во входном сечении бокса достигает на максимальном режиме работы двигателя величины 97%, что выше нормируемого значения 50%;

- величина относительной поправки на входной импульс на «максимальном» режиме работы двигателя с учетом отрывного режима течения в боксе составила $\Delta\bar{R}_{\text{вх}} = 2,4\%$ вместо $\Delta\bar{R}_{\text{вх}} \approx 1,2\%$ в случае безотрывного течения потока в боксе (при неравномерности скорости $\bar{v}_1 = 1,2$).

Для уменьшения неравномерности поля скоростей во входном сечении бокса до допустимого уровня ($\leq 50\%$) и исключения отрыва потока при его повороте во всасывающей вертикальной шахте рекомендуется в верхней части поворотного колена передней всасывающей шахты установить 4–5 направляющих аппаратов, а также выравнивающую сетку на начальном входном участке бокса на расстоянии $L/D_{\text{вх}} \geq 2,5$ от лемнискатного насадка испытываемого двигателя.

4. Целесообразно продолжение методической работы по определению аэродинамической поправки к силе от тяги ГТД с целью разработки отраслевого руководящего технического материала и стандарта по определению стендовой тяги ТРДД с большой степенью двухконтурности, в том числе с отдельными контурами в (закрытых) боксах испытательных стендов.

Литература

1. ОСТ 101021-93. Стенды испытательные авиационных газотурбинных двигателей. 1993. 18 с.
2. ОСТ 102781-2004. Сила аэродинамическая при испытании ГТД на наземных закрытых стендах. МВИ. 2004. 14 с.
3. Тимошин А.Н., Максимов Е.А. Влияние аэродинамики наземных стендов на измеряемое усилие тяги при испытаниях ГТД // Труды ЦИАМ, № 787, 1978. 16 с.
4. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Ленинград: Наука, 1968. 99 с.

References

1. OST 101021-93. Stendy ispytatel'nye aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei [Industry standard 101021-93. Test Facilities for Aircraft Gas Turbine Engines]. 1993. 18 p.
2. OST 102781-2004. Sila aerodinamicheskaiia pri ispytanii GTD na nazemnykh zakrytykh stendakh. MVI [Industry standard 102781-2004. The Aerodynamic Force During a Gas Turbine Engine Testing at Closed Ground Test Facility. Measurement Procedure]. 2004. 14 p.
3. Timoshin A.N., Maksimov E.A. Vliianie aerodinamiki nazemnykh stendov na izmeriaemoe usilie tiagi pri ispytaniakh GTD [Influence of Aerodynamic of Ground Test Facilities on Measured Thrust During Tests of Gas Turbine Engine]. Moscow: CIAM. No. 787. 1978. 16 p.
4. Zaidel' A.N. Elementarnye otsenki oshibok izmerenii [The Elementary Estimates of a Measurement Error]. Leningrad: Nauka, 1968. 99 p.

Материалы получены редакцией 08.06.2018